

Список литературы

1. Проскуркин, Е.В. Защитные цинковые покрытия: сопоставительный анализ свойств, рациональные области применения / Е.В. Проскуркин // Оборудование. – 2005. – № 3. – С. 66–71.

2. Understanding corrosion via corrosion product characterization: I. Case study of the role of Mg alloying in Zn–Mg coating on steel /P. Volovitch [et al.] // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51. – P. 1251–1262.

3. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts [Электронный ресурс] / V M Konstantinov, I A Bulochyk. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering № 71, 2015 Article ID: 012063. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012063>. – Дата доступа: 08.05.17.

4. Константинов, В.М. Разработка совмещенного процесса термической и антикоррозионной обработки стальных деталей авто-техники / В.М. Константинов, П.С. Гурченко, И.А. Булойчик // Инновации в машиностроении-2014: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2014. – Том 3. – С. 384–387.

УДК 621.791, 669.017

Б.М. НЕМЕНЁНОК, д-р техн. наук,
И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук,
П.Е. ЛУЩИК, канд. техн. наук (БНТУ),
А.А. РАДЧЕНКО, канд. техн. наук (НАН Беларуси)

СОЕДИНЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА: ОБЗОР СПОСОБОВ

Введение. Изделия и конструкции из разнородных материалов, прежде всего, легких сплавов, являются востребованной продукцией авиакосмической, автомобиле- и тракторостроительной, горнодобывающей, строительной, сельскохозяйственной, машиностроительной, химической, нефтедобывающей и других отраслей промышленности. Использование соединений разнородных легких сплавов, например, таких как алюминийевые, магниевые и титановые

сплавы, позволяет создавать легкие конструкции благодаря сочетанию удовлетворительной прочности, хорошей пластичности и низкому удельному весу. Однако эти сплавы, как правило, менее пригодны для обработки и получения неразъемных соединений по сравнению с обычными сталями, и в большинстве случаев их сварка обычными методами плавления затруднительна или невозможна [1].

Алюминиевые сплавы, благодаря сочетанию низкой плотности, достаточно высокой удельной прочности, ударопрочности, коррозионной стойкости, высокой устойчивости к низким и относительно высоким температурам при их относительно небольшой цене в настоящее время являются одними из наиболее востребованных современных промышленных материалов.

Титановые сплавы обладают высокой механической прочностью (превосходящей удельную прочность большинства сталей), повышенной коррозионной стойкостью (сопоставимой с коррозионной стойкостью алюминиевых сплавов) и высокой жаропрочностью. Эти сплавы находят широкое применение при изготовлении металлоизделий и конструкций, предназначенных для работы в условиях высоких температур, сохраняя при этом хорошие механические свойства. Высокие механические свойства, низкая плотность и высокая коррозионная стойкость делают титан и его сплавы очень привлекательными конструкционными материалами в различных отраслях промышленности. Однако, из-за высокой реакционной способности и сложностей производственного процесса получения титан имеет относительно высокую стоимость. В связи с этим некоторые конструкционные элементы и компоненты из титана частично заменяют элементами из более дешевых материалов, как правило, нержавеющей стали или алюминия и его сплавов. В случае применения алюминиевых элементов конструкций обеспечивается дополнительное снижение их веса. Основное требование, сформулированное инженерами-конструкторами в отношении таких конструкций, используемых при производстве оснастки, автомобилестроении, авиации, электронике, производстве оборудования и теплообменников в химической промышленности, — возможность получения высокопрочных соединений вышеуказанных материалов с использованием методов сварки и обеспечения хорошего качества таких соединений [2].

Применение комбинированных соединений легких сплавов, таких как алюминиевые и титановые, благодаря их низкой плотности, высокой механической прочности и коррозионной стойкости, является актуальным и весьма востребованным для производства инновационной продукции различного назначения в стратегических отраслях промышленности, таких как авиационная, космическая, автомобильная, судостроительная, машино- и приборостроение и др. Сравнительно низкие и стабильные значения коэффициента теплового расширения этих сплавов обеспечивают возможность получения конструктивных соединений этих материалов. Отмечается, что биосовместимость, противомикробные свойства позволяют широко использовать их в ортопедии и стоматологии, обеспечивая возможность применения в качестве биохимически неактивных материалов для изделий медицинского назначения [1].

Проектирование соединения, как указывают авторы работы [3], представляет собой сложный, многостадийный процесс, который требует учета различных факторов и свойств материалов и их соединений, таких как усталостная прочность, структурная целостность, качество поверхности, технологичность получения, поглощение энергии, шум, вибрация и жесткость. Выбор материала и проектирование с использованием разнородных материалов приводит к необходимости учитывать химическое и термодинамическое взаимодействие соединяемых элементов. Чтобы спроектировать высокопрочное соединение из разнородных материалов гарантированного качества, требуется обширная база инженерных знаний в области материаловедения, химического и структурного анализа, физико-механических испытаний, применение математических методов и инструментов компьютерного моделирования.

Обзор методов получения соединений разнородных материалов и их обсуждение. Для изготовления высокопрочных инженерных конструкций и изделий ответственного назначения большое значение имеет применение легких сплавов, прежде всего, на основе алюминия и титана.

Использование алюминиевых сплавов в металлоконструкциях различного назначения является предпочтительным ввиду их очевидных сравнительных преимуществ перед другими сплавами, включая невысокую стоимость, высокие технологические и эксплуатационные свойства. Немаловажными факторами являются отно-

сительно устойчивая динамика снижения стоимости алюминия (рисунок 1) и рост его мирового производства в последние годы (рисунок 2). При этом основной вклад в общемировой объем производства алюминия вносит Китай, на долю которого, например, по данным International Aluminium Institute (IAI), за 2018 г. пришлось свыше 56,7 % от всего количества произведенного в мире алюминия [4].



Рисунок 1 – Динамика цен на алюминий на Лондонской бирже металлов за 2006–2019 гг. (по данным сайта <http://metal4u.ru/lme/>, с 01.01.2006 по 28.08.2019)

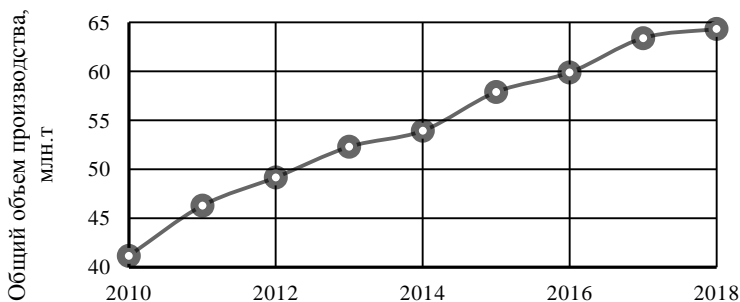


Рисунок 2 – Общий объем мирового производства алюминия за 2010–2018 гг. (по данным International Aluminium Institute (IAI), <http://www.world-aluminium.org>) [4]

В работе [5], в которой представлен обзор технологий соединения разнородных материалов многофункционального назначения для автомобильной промышленности, отмечается, что алюминиевые сплавы по сравнению с магниевыми представляются наиболее перспективными из-за их стоимости. Указывается, что автомобильная промышленность европейских стран более чем удвоила среднее количество алюминия, используемого в легковых автомобилях за последнее десятилетие, и эта тенденция будет усиливаться еще больше в ближайшие годы. «Доступность [алюминия] в большом разнообразии полуфабрикатов (литье, продукты экструзии, листовой материал) является основным преимуществом. Это делает алюминий очень подходящим для массового производства и инновационным решением для компактных деталей» [5].

Наряду с легкими сплавами, широкое распространение для использования в инженерных конструкциях стали получать также металломатричные, металлокерамические и полимерные композиционные материалы, благодаря преимуществам, связанным с их малым весом, высокими показателями удельной прочности и модуля упругости [5–9]. Существенный прогресс, достигнутый в последние годы в технологиях многокомпонентного дизайна и соединений разнородных материалов, способствовал увеличению интереса к использованию разнородных, в том числе композиционных, материалов в различных отраслях промышленности. Например, современные транспортные средства содержат большое количество механических деталей, полученных различными производственными процессами из разнородных материалов, прежде всего, на основе алюминия (автомобили, как правило, состоят из 10 000–30 000 деталей, а число деталей самолетов исчисляется миллионами [5]).

Для соединений разнородных материалов в зависимости от эксплуатационных требований и функционального назначения изделий и конструкций также могут использоваться различные варианты механических креплений (соединений), таких как муфтовые, заклепочные, винтовые, болтовые, методы пайки, склеивания (клеевые соединения) и сварки. Каждый тип соединения имеет свои преимущества и недостатки, и наиболее подходящий способ будет определяться функциональным назначением и предъявляемыми требованиями к изделию или конструкции [10].

Механическое соединение, изначально используемое для соединений типа «металл/металл», в настоящее время применяется и для получения гибридных соединений «металл/полимер». Соединение такого типа предполагает использование крепежных элементов, таких как винты, болты или заклепки, без формирования зоны физического смешивания соединяемых материалов, что требует применения определенных механических операций, таких как сверление отверстий и изготовление резьбы. Конфигурация соединения зависит от условий эксплуатации, например, от того, должна ли она быть герметичной. В некоторых случаях соединение может быть спроектировано таким образом, чтобы выдерживать несоответствие коэффициента теплового расширения во время сборки. Соединение также может быть выполнено для обеспечения свободы перемещения в плоскости, перпендикулярной зажимному элементу.

Механическое крепление остается наиболее часто используемым способом соединения из-за его простоты. Тем не менее, он имеет ограничения, такие как увеличение веса компонента и концентрации напряжений вокруг отверстий крепления, которые снижают прочность и в конечном итоге создают коррозию [10].

Адгезивное соединение (склеивание) разнородных материалов в твердом состоянии основано на формировании межмолекулярных сил между соединяемыми материалами и клеевым раствором, как правило, полимерным, который в процессе протекания химической или физической реакции обеспечивает формирование соединения.

В последние годы использование клеевого соединения значительно расширилось из-за разработки высокопрочных клеев, способных выдерживать как статические, так и переменные нагрузки. Кроме того, они, как правило, весят меньше, чем механические крепления, что позволяет значительно снизить вес. Кроме того, распределение нагрузки становится более равномерной. Однако применение клеевых соединений может оказаться проблематичным, поскольку они не могут быть разобраны без повреждений, могут выделять вредные выделения в окружающую среду, быть подвержены деградации от воздействия влаги, температуры и имеют низкое сопротивление в химически активной среде. Кроме того, склеивание требует специальной подготовки поверхности. Дополнительным ограничением является то, что склеенные соединения часто разрушаются мгновенно, а не постепенно. Наиболее важным огра-

ничающим фактором для склеивания является неопределенность в прогнозировании долгосрочной долговечности этого вида соединения из-за трудностей в проведении надежного неразрушающего контроля [10].

Как механическое, так и клеевое соединение требуют обеспечения определенных перекрывающихся конфигураций соединяемых материалов для достижения необходимой прочности, что приводит к увеличению веса, толщины, образованию участков повышенной концентрации напряжений и ограничивает использование этих методов соединения для изделий и конструкций ответственного назначения.

В связи с тем, что инновационные способы получения высокопрочных соединений являются ключевым фактором для расширения областей применения современных материалов и их комбинаций, в последние годы активно разрабатываются новые технологии пайки, обеспечивающие повышенные требования механической прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости при определенных условиях эксплуатации. В настоящее время такие технологии, как высокотемпературная пайка суперсплавов на основе кобальта, дуговая пайка алюминиевых матричных композитов (АМК), индукционная пайка разнородных материалов и соединение с использованием наноматериалов, находятся в центре внимания проводимых исследований [11].

Соединение титана и алюминия и их сплавов с помощью методов диффузионной пайки исследовали авторы работы [2]. Такое соединение формируется с использованием металлического припоя, подаваемого извне или образующегося как легкоплавкая фаза в процессе диффузионного взаимодействия на границе раздела материалов, соединяемых друг с другом, или с промежуточным слоем, размещенным между такими материалами. Диффузионная пайка, также называемая TLP-связыванием (переходное соединение в жидкой фазе), реализуется при температуре выше 500–800 °С. При этом на прочность паяных соединений титана и других металлов существенно влияет наличие интерметаллических фаз так называемой неконгруэнтной плавкости (фаза не существует в жидком состоянии, если концентрация компонентов соответствует химическому составу фазы), формирующихся обычно в виде непрерывных слоев, часто образующихся в результате перитектической реакции.

Отрицательное влияние на прочность паяных соединений характерно для твердых и хрупких интерметаллических фаз с титаном, таких как Ti-Cu, Ti-Fe (Ti-Fe-Cr, Ti-Fe-Ni), Ti-Ni, Ti-Cr и Ti-Al, а также твердых растворов на основе этих фаз [2].

Основные физико-химические свойства алюминия и титана, по данным [2], представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные физико-химические свойства алюминия и титана [2]

Свойства	Алюминий	Титан
Температура плавления, °C	660	1668
Плотность, кг/дм ³	2,7	4,05
Коэффициент линейного термического расширения, 1/K в диапазоне температур 0–1000 °C	$(24-33) \cdot 10^{-6}$	$(7-12) \cdot 10^{-6}$
Теплопроводность, Вт/м·К	200–240	22,6
Прочность на растяжение, МПа	90–120	500–700
Энергия образования оксидов (энтальпия), кДж/мольO ₂	Al ₂ O ₃ /1116,2	TiO ₂ /916,9

Отмечается, что система титан-алюминий (титановые сплавы-алюминиевые сплавы) относится к труднопаяным системам из-за значительно различающихся температур плавкости соединяемых материалов (как следствие, ограниченный выбор припоев), наличия стабильных оксидных слоев (не смачиваемых при пайке металлическим припоем) на поверхности соединяемых материалов, высокой реакционной способности титана практически со всеми металлами и газами, образования твердых и хрупких интерметаллических фаз (в припоях), приводящих к ухудшению механических свойств паяных соединений. При диффузионной пайке системы титан-алюминий из-за довольно низкой плавкости алюминия (температура плавления 660 °C и, соответственно, еще ниже в случае алюминиевых сплавов) необходимо использовать относительно низкие температуры процесса (ниже 600 °C), что существенно затрудняет процесс диффузионной пайки [2].

Высокопрочное соединение титана и алюминия и их сплавов с помощью методов сварки также довольно сложно получить из-за различных физико-химических свойств (различие температуры

плавления, теплопроводности, коэффициента термического расширения, реакционной способности с газами, присутствующими в окружающей среде), а также из-за образования хрупких интерметаллических фаз в зонах термического влияния [2].

Сварочные процессы весьма разнообразны, тем не менее, можно выделить две основные группы способов сварки – сварка плавлением и сварка давлением [12]. Сварка плавлением включает технологии соединения металлов и сплавов, обеспечивающие расплавление материалов в локальной области, в том числе способы дуговой сварки (дуговая сварка плавящимся электродом, дуговая сварка под флюсом, сварка металла в инертном газе, сварка в активном газе, электрогазосварка, сварка дуговая угольным электродом, дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа, дуговая точечная сварка, атомно-водородная сварка, сварка дуговая плазменная), а также газовой, термитной, электронно-лучевой, электрошлаковой, лазерной сварки, сварки световым излучением дуги.

При использовании способов сварки давлением соединение образуется в результате деформации металлических поверхностей в месте контакта соединяемых изделий. К таким способам сварки относят разнообразные процессы контактной сварки, ударной, кузнечной, ультразвуковой, диффузионной сварки, сварки взрывом, трением и др.

Методы, рекомендованные для изготовления соединений материалов на основе алюминия и титана, по данным работы [2], включают несколько специальных видов сварки плавлением (электронно-лучевая сварка, лазерная сварка) и сварки давлением (диффузионная сварка, сварка трением).

В работе [1], в которой приводится обзор основных видов сварки, используемых для получения соединений между коммерчески наиболее используемыми легкими сплавами (алюминиевыми, магниевыми и титановыми), отмечается, что при сварке указанных материалов могут быть приняты во внимание как традиционные способы, такие как сварка металлическим электродом в газовой среде (MIG, GMAW), так и более новые виды, такие как сварка лазерным лучом (LBW) и электронно-лучевая сварка (EBW). Указывается, что хотя LBW-метод и дает лучшие результаты, разнородные сварные швы страдают от типичных дефектов из-за плавления материала, таких как трещины, пустоты и пористости. Кроме того, из-за высо-

ких температур в процессе сварки наблюдается образование интерметаллидов, ведущих, в большинстве проанализированных случаев, к хрупкому поведению и плохим механическим характеристикам сварного соединения.

Например, в работе [13] исследовали структуру и свойства сварного шва соединений, полученных из листового алюминиевого сплава AA6056 и титанового сплава Ti6Al4V, сваренного встык лазерным лучом без использования присадочной проволоки, обеспечивая процесс сварки путем плавления только алюминиевого сплава. Было установлено, что на границе раздела сварного шва образуется интерметаллическая хрупкая фаза $TiAl_3$, которая существенно влияет на механические свойства соединения. Оптимизация конструкции соединения путем снятия фаски листа из сплава Ti6Al4V привела к уменьшению количества образующихся на межфазной границе раздела интерметаллидов $TiAl_3$. В этой работе показано, как сравнительно незначительное изменение конструкции соединения привело к формированию сварного шва с улучшенной микроструктурой, повышенной твердостью и прочностью, сопротивлением распространению усталостной трещины. В результате оптимизации конструкции соединения тип разрушения в зоне плавления алюминиевого сплава AA6056, прилегающей к границе раздела сварного шва, изменился с частично межкристаллического на полностью транскристаллический.

Авторы работы [1] приходят к выводу, что для сварки легких сплавов с целью преодоления вышеупомянутых дефектов могут быть успешно использованы процессы в твердой фазе, такие как диффузионная сварка, сварка взрывом и сварка трением с перемешиванием (СТП). При этом указывается, что при СТП можно обеспечить получение соединений разнородных материалов, даже таких, которые сильно отличаются по своим механическим и термическим свойствам [14]. Также отмечается, что для процессов СТП для правильной подачи тепла в зону сварки особенно важен правильный выбор параметров сварки, прежде всего, параметры перемещения инструмента и взаимное расположение листовых материалов. Несмотря на то, что процесс проводится при температурах ниже температур плавления основных материалов, интерметаллиды все еще могут появляться из-за ликвации или диффузии атомов в зоне сварного шва. Отмечается, что в большинстве случаев присут-

ствие интерметаллидов приводит к увеличению твердости, хрупкости и снижению механической прочности сварного шва.

Возможности процесса СТП, структура и свойства полученных сварных швов в последние годы активно исследуются с целью получения соединений различных материалов, в том числе алюминиевых, титановых, медных сплавов [15–24].

Среди преимуществ СТП авторами исследований указывается возможность получать прочные сварные швы разнородных материалов; безопасность процесса для окружающей среды; отсутствие необходимости в присадочной проволоке; низкие остаточные напряжения; мелкий размер зерна сварного шва; малый расход энергии; отсутствие пористости, особых требований к процессу сварки и необходимости в подготовке кромок до сварки и механической обработки после нее [15]. Отмечается, что достоинствами процесса СТП является отсутствие или ограниченное количество интерметаллических соединений в структуре шва, отсутствие трещин, характерных для традиционных видов сварки [23].

Однако, несмотря на достаточно большой объем полученных экспериментальных данных, теория сварочных процессов СТП, как указывают авторы работы [15], находится в стадии разработки, поскольку физика процессов сложна, многофакторна и требует учета одновременно протекающих процессов тепло- и массопереноса, изменения температуры, пластической деформации, контактных явлений и трения. Отмечается, что исследование процессов СТП затруднено сложностью наблюдения деталей процесса смешения материалов в связи с большими напряжениями и скоростями деформации, поэтому для изучения процессов СТП предпринимаются усилия по численному моделированию СТП [25].

Таким образом, на сегодняшний день накоплен обширный опыт исследований различных способов соединения алюминиевых и титановых сплавов, в том числе, сваркой электрической дугой, электронным пучком, лазерной сваркой. Проведенные эксперименты показали, что отсутствие правильной оценки реакционной способности сплавов, подлежащих соединению, в том числе повышенная способность титана к окислению при высоких температурах, и конструктивных особенностей соединений может приводить к ряду проблем, связанных с изменением структуры материалов и дефектами в зоне сварки, что приводит к неизбежному ухудшению меха-

нических характеристик готовых соединений. С целью преодоления вышеупомянутых дефектов могут быть успешно использованы твердофазные сварочные процессы, такие как диффузионная сварка, сварка взрывом и сварка трением с перемешиванием.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т19ИНДГ-007 «Исследование межфазного взаимодействия и формирования структуры зерна в швах, полученных сваркой трением, для различных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов с титановыми сплавами».

Список литературы

1. Micari, Fabrizio. Friction Stir Welding as an effective alternative technique for light structural alloys mixed joints / Fabrizio Micari, Gianluca Buffa, S. Pellegrino, Livan Fratini // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19–24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – Procedia Engineering 81 (2014). – P. 74–83.

2. Winiowski, A. Brazing of titanium with aluminium alloys / A. Winiowski, D. Majewski // Arch. Metall. Mater. – 2017, Vol.62 (2). – P. 763–770.

3. Modi, S. Mixed Material Joining Advancements and Challenges / S. Modi, M. Stevens, M. Chess // Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI. May 2017. – 29 p.

4. The website of the International Aluminium Institute (IAI): <http://www.world-aluminium.org>; 28.08.2019.

5. Yuce, Celalettin. A review on advanced joining techniques of multi material part manufacturing for automotive industry / Celalettin Yuce, Fatih Karpat, Nurettin Yavuz, Oguz Dogan // International Journal of Mechanical And Production Engineering. – 2015. – Vol. 3, Issue 5. – P. 63–68.

6. Cantor, Brian. Metal and Ceramic Matrix Composites / Brian Cantor, Fionn P.E. Dunne, Ian C. Stone // CRC Press. – 2003. – 430 p.

7. Bala G. Narasimha. A Review on Processing of Particulate Metal Matrix Composites and its Properties / Bala G. Narasimha, Vamsi M. Krishna, Dr. Anthony M. Xavier // International Journal of Applied Engineering Research. – 2013. – Vol. 8, No 6. – P. 647–666.

8. Divya, H.V. Processing Techniques of Polymer Matrix Composites – A Review / H.V. Divya, L. Laxmana Naik, B. Yogesha // International Journal of Engineering Research and General Science. – 2016. – Vol. 4, Issue 3. – P. 357–362.

9. Рафальский, И.В. Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения / И.В. Рафальский. – Минск: БНТУ, 2016. – 308 с.

10. Techniques for joining dissimilar materials: metals and polymers / Paul Kah [et al.] // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2014. – Vol. 36. – P. 152–164.

11. Research trends in brazing and soldering / Sebastian Weis [et al.] // Przegląd Spawalnictwa. – 2017. – Vol. 89 (7). – P. 37–44.

12. British Standards Institution, 1983 BS 499: Part 1 [Welding Terms and Symbols, Glossary of welding, brazing and thermal cutting].

13. Improving interfacial properties of a laser beam welded dissimilar joint of aluminium AA6056 and titanium Ti6Al4V for aeronautical applications / W.V.Vaidya [et al.] // Journal of Materials Science. – 2010. – Vol. 45 (22). – P. 6242–6254.

14. СТБ ISO 15620-2008 «Сварка. Сварка трением металлических материалов». – 44 с.

15. Карманов, В.В. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов: сущность и специфические особенности процесса, особенности структуры сварного шва / В.В. Карманов, А.Л. Каменева, В.В. Карманов // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2012. – № 32. – С. 67–80.

16. Optimization of process parameters: tool pin profile, rotational speed and welding speed for submerged friction stir welding of AA6063 alloy / R. Lokesh [et al.] // International Journal of Technical Research and Applications. – 2015. – Special Issue 12. – P. 35–38.

17. Abdel-Wahab El-Morsy. Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-T4 Aluminum Alloy / Abdel-Wahab El-Morsy, Mohamed M. Ghanem,

Haitham Bahaitham // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2018. – Vol. 8, No. 1. – P. 2493–2498.

18. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints / Ameth Fall [et al.] // Metals. – 2016. – Vol. 6, 275. – 12 p.

19. Microstructure and Mechanical Properties of Friction StirWelded Dissimilar Titanium Alloys: TIMET-54M and ATI-425 / Kapil Gangwar // Metals. – 2016. – Vol. 6, 252. – 14 p.

20. Gangwar, Kapil. Friction Stir Welding of near α and $\alpha+\beta$ Titanium Alloys: Metallurgical and Mechanical Characterization / Kapil Gangwar, Ramulu Mamidala, Daniel G. Sanders // Metals. – 2017. – Vol. 7, 565. – 23 p.

21. Recent Developments and Research Progress on Friction Stir Welding of Titanium Alloys: An Overview / Sivaji Karna [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018, Issue 330. – 16 p.

22. L. Suvarna Raju. Effect of Welding Speed on Mechanical Properties of Friction Stir Welded Copper / L. Suvarna Raju, Dr. Adepu Kumar, Dr. P. Indreswaraiah // Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science. – 2014. – Vol. 4, No. 2. – P. 68–71.

23. Liu, Liming. A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys / Liming Liu, Daxin Ren, Fei Liu // Materials. – 2014. – Vol.7. – P. 3735–3757.

24. Aravindkumar, D. A review on friction stir welding of dissimilar materials between aluminium alloys to copper / D. Aravindkumar, A. Balamurugan // International Journal of Latest Research in Engineering and Technology (IJLRET). – 2016. – Vol. 2, Issue 2. – P. 9–15.

25. Моделирование тепловых процессов для улучшения структуры металлов и сплавов методом трения с перемешиванием / А.Л. Майстренко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2015, № 1. – С. 5–14.